

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION  
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété  
Intellectuelle  
Bureau international



(43) Date de la publication internationale  
3 janvier 2002 (03.01.2002)

PCT

(10) Numéro de publication internationale  
**WO 02/01683 A1**

(51) Classification internationale des brevets<sup>7</sup> :

H01S 3/0941

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **FEUGNET, Gilles** [FR/FR]; Thales Intellectual Property, 13, avenue du Prés. Salvador Allende, F-94117 Arcueil Cedex (FR). **LALLIER, Eric** [FR/FR]; Thales Intellectual Property, 13, avenue du Prés. Salvador Allende, F-94117 Arcueil Cedex (FR). **LARAT, Christian** [FR/FR]; Thales Intellectual Property, 13, av. du Prés. Salvador Allende, F-94117 Arcueil Cedex (FR). **BOCHOLLE, Jean-Paul** [FR/FR]; Thales Intellectual Property, 13, avenue du Prés. Salvador Allende, F-94117 Arcueil Cedex (FR). **ROLLY, Didier** [FR/FR]; Thales Intellectual Property, 13, avenue du Prés. Salvador Allende, F-94117 Arcueil cedex (FR).

(21) Numéro de la demande internationale :

PCT/FR01/01813

(22) Date de dépôt international : 12 juin 2001 (12.06.2001)

(25) Langue de dépôt :

français

(26) Langue de publication :

français

(30) Données relatives à la priorité :

00/08519

30 juin 2000 (30.06.2000) FR

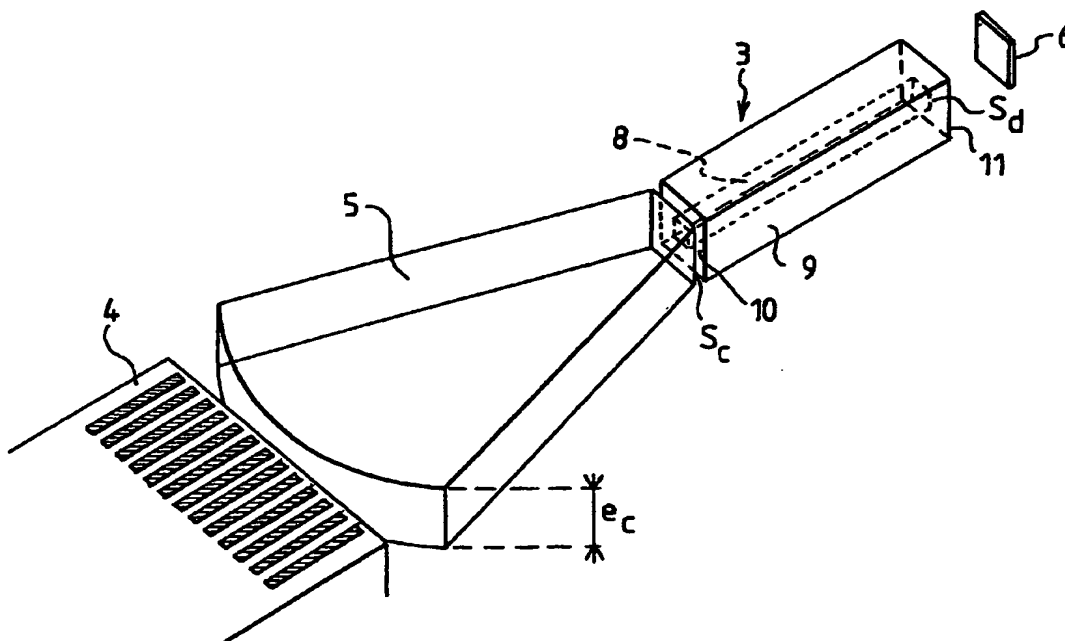
(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :  
**THALES** [FR/FR]; 173, boulevard Haussmann, F-75008 Paris (FR).

(74) Mandataire : **DUDOUT, Isabelle**; Thales Intellectual Property, 13, av. du Prés. Salvador Allende, F-94117 Arcueil Cedex (FR).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: PUMPED LASER AND OPTIMISED LASING MEDIUM

(54) Titre : LASER POMPE ET MILIEU LASER OPTIMISE



(57) Abstract: The invention concerns a longitudinally pumped laser comprising one or several active lasing media arranged in an optical cavity and pumping means (4) emitting at least a pump beam towards the active lasing media (3), means coupling (5) the beam(s) with the active medium. The invention is characterised in that at least one of the active lasing media comprises one or several non-homogeneously doped zones (8) and the dimension of said doped zones (8) and/or the distribution of the doping agents is selected on the basis of the desired transverse mode. Said laser is useful as amplifier.

[Suite sur la page suivante]

WO 02/01683 A1



(81) États désignés (*national*) : CA, JP, US.

(84) États désignés (*régional*) : brevet européen (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR).

Déclaration en vertu de la règle 4.17 :

— *relative au droit du déposant de revendiquer la priorité de la demande antérieure (règle 4.17.iii) pour toutes les désignations*

Publiée :

— *avec rapport de recherche internationale*

*En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.*

(57) **Abrégé** : Laser pompé longitudinalement comprenant un ou plusieurs milieux actifs lasers disposés dans une cavité optique et au moins un moyen de pompage (4) émettant au moins un faisceau de pompe vers le ou les milieux actifs lasers (3), des moyens de couplage (5) du ou des faisceaux de pompe avec le milieu actif caractérisé en ce que au moins un des milieux actifs lasers comporte une ou plusieurs zones (8) dopées de façon non homogène et en ce que la dimension desdites zones (8) dopées et/ou la répartition des dopants est choisie en fonction du mode transversal souhaité. Utilisation du laser comme amplificateur.

### **Laser pompé et milieu laser optimisé**

L'invention concerne les lasers pompés et les milieux lasers optimisés.

Elle s'applique plus particulièrement aux lasers pompés diode, par exemple un laser pompé diode comportant une optique de couplage simple.

5 Elle peut aussi être utilisée comme un amplificateur de faisceaux de type lasers.

La géométrie de pompage des lasers pompés par lampe est quasiment exclusivement une géométrie de pompage dite transversale, c'est-à-dire que la direction de propagation du faisceau dans la cavité  
10 optique et la plus grande dimension des lampes sont parallèles. La lumière émise par les lampes pénètre dans le milieu laser par ses faces transverses.

Les diodes lasers dont l'émission est plus directive que celle d'une lampe permettent d'envisager une autre géométrie de pompage dite  
15 longitudinale. Le faisceau de pompe et le faisceau laser se propagent alors selon des directions voisines, le rendement du laser étant favorisé lorsque ces deux faisceaux se superposent avec des sections voisines dans le milieu laser. Il est aussi possible de favoriser un fonctionnement sur le mode fondamental  $TEM_{00}$  de la cavité stable lorsque la dimension du faisceau  
20 pompe est voisine de la dimension du mode fondamental.

Les faisceaux lasers fondamentaux des cavités stables ont des sections circulaires ou plus moins elliptiques qui ne coïncident pas nécessairement avec la forme des surfaces émissives des diodes lasers. Pour obtenir la superposition du faisceau pompe avec le faisceau du laser il  
25 est connu d'utiliser un système optique de focalisation ou de remise en forme de la lumière émise.

Par exemple, la réalisation d'un laser pompé longitudinalement nécessite l'emploi d'un système optique focalisant la lumière émise par une ou plusieurs barrettes de diodes laser de puissance.

30 La figure 1 montre un exemple d'une barrette 1 de diode laser comportant plusieurs diodes laser élémentaires 2 disposées côte à côte. Les diodes laser ont chacune une zone émissive dont la largeur  $l_b$  varie de quelques microns à quelques centaines de microns par exemple, et une

hauteur  $h_b$  de l'ordre du micron. L'étendue de la zone d'émission s'avère de ce fait très dissymétrique. En effet, les barrettes ont généralement une dimension d'environ 1 cm et une divergence  $\theta_{\parallel}$  de l'ordre de  $10^\circ$  dans le plan  $D_{\parallel}$  parallèle à la jonction. Dans le plan  $D_{\perp}$  à la jonction, la dimension est de l'ordre de  $1 \mu\text{m}$  et la divergence  $\theta_{\perp}$  de  $50^\circ$ . Ainsi, l'étendue géométrique d'une barrette est environ 2000 fois plus grande selon le plan  $D_{\parallel}$  que selon le plan  $D_{\perp}$ . La forte valeur de l'étendue géométrique dans le plan  $D_{\parallel}$  et la forte dissymétrie entre  $D_{\parallel}$  et  $D_{\perp}$  rendent difficile la conception de systèmes optiques de focalisation de la lumière émise avec le milieu laser actif.

Compte tenu des caractéristiques actuelles des barrettes de puissance, la lumière émise peut être focalisée sur une tache de 1 à 2 mm environ de diamètre avec des rendements d'au moins 70 % (rapport entre la puissance moyenne transmise et la puissance moyenne émise).

En sortie d'un tel système optique la lumière est très divergente ce qui est fâcheux car :

- le seuil d'oscillation du laser augmente avec le volume dans lequel l'énergie de pompe est déposée, et
- un fonctionnement multimode peut être induit si ce volume est plus grand que le volume occupé par le mode fondamental de la cavité.

Il est connu pour diminuer ces phénomènes d'utiliser des cristaux fortement dopés, le volume nécessaire pour absorber la puissance de pompe diminuant lorsque le coefficient d'absorption augmente. Cette solution présente néanmoins certains inconvénients, par exemple :

- favoriser l'apparition d'aberrations, de contraintes et de biréfringences d'origine thermique, la correction de ces effets devient difficile et le mode de fonctionnement en mode  $TEM_{00}$  n'est plus possible,
- réduire l'énergie de pompe susceptible d'être déposée sans atteindre le seuil d'endommagement du matériau, et
- limiter le choix des matériaux lasers.

Il est aussi connu de l'art antérieur d'utiliser des milieux lasers dopés de façon non homogène.

Par exemple, certains lasers ayant une géométrie de pompage transversale utilisent des milieux dopés non uniformément afin de sélectionner le mode souhaité.

Dans d'autres applications, les barreaux lasers pompés longitudinalement ont une géométrie telle que la section du barreau est très petite devant la longueur utilisant le guidage de la lumière de pompe par réflexion totale sur la périphérie du barreau. Toutefois, la sélection de mode par le dopage n'est pas réalisée. Un exemple de réalisation est donné dans les références E.C.Honea and al, Optics Letters, p 1203, OSA 1998 ou E.C.Honea and al, Optics Letters, p 154, OSA 1999.

L'idée de l'invention consiste, notamment, à utiliser comme milieu actif laser un matériau dopé de manière non homogène, comportant une ou plusieurs zones dans laquelle ou lesquelles, la distribution des dopants est notamment choisie en fonction d'un mode du laser favorisé, tel que le mode transversal souhaité.

Elle repose aussi sur l'association d'un système optique de focalisation simple traitant de façon globale la source lumineuse issue de la diode avec le milieu actif laser non uniformément dopé.

L'invention concerne un laser pompé longitudinalement comprenant un ou plusieurs milieux actifs lasers disposés dans une cavité optique et au moins un moyen de pompage émettant au moins un faisceau de pompe vers le ou les milieux actifs lasers, des moyens de couplage du ou des faisceaux de pompe avec le milieu actif. Il est caractérisé en ce qu'au moins un des milieux actifs lasers comporte une ou plusieurs zones dopées de façon non homogène et en ce que la dimension desdites zones dopées et/ou la répartition des dopants est choisie en fonction du mode transversal de la cavité laser souhaité.

La zone dopée est disposée par exemple de manière sensiblement centrale dans le milieu actif, ses dimensions sont adaptées au mode fondamental de la cavité laser ou au mode transversal et la zone périphérique non dopée a des dimensions adaptées au moyen de couplage.

La section  $s_d$  de la face d'entrée de la zone dopée qui reçoit le faisceau de pompe est par exemple inférieure ou égale à la section  $s_m$  du mode fondamental de la cavité.

La section  $s_d$  de la face d'entrée de la zone dopée qui reçoit le faisceau de pompe peut être au moins supérieure à la section  $s_m$  du mode

fondamental de la cavité, la cavité laser comportant un dispositif de sélection.

Selon un autre mode de réalisation le milieu laser actif comporte une zone centrale non dopée entourée d'une zone périphérique dopée.

5 La zone dopée a par exemple une forme parallépipédique ou circulaire ou elliptique.

Le ou les moyens de pompage peuvent comporter une ou plusieurs barrettes de diode et les moyens de couplage être constitués d'un concentrateur de lumière adapté à recevoir l'ensemble de la lumière émise  
10 par les barrettes de diodes.

Les moyens de couplage comportent par exemple au moins un des dispositifs choisis dans la liste suivante : un système de focalisation par réfraction ou un système par diffraction ou un système par réflexion ou un système de remise en forme de l'étendue d'un faisceau.

15 La distribution des dopants dans le milieu actif est par exemple réalisée selon un gradient.

Les dopants sont par exemple choisis parmi un ou plusieurs des ions de la liste suivante : ( $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Th}^{3+}$ ,....).

La face du milieu actif en regard du moyen de couplage est par  
20 exemple traitée anti-reflet à la longueur d'onde de pompage et réfléchissante à la longueur d'onde laser et la face du milieu actif à l'opposé est par exemple traitée antireflet à la longueur d'onde laser.

L'invention concerne aussi un procédé de fabrication d'un milieu actif utilisé dans les lasers. Il est caractérisé en ce qu'il comporte au moins  
25 une étape de réalisation d'un ou de plusieurs morceaux d'une matrice dopée et d'une matrice non dopée de façon à obtenir un milieu actif comportant une ou plusieurs zones ou volume ayant une dimension et/ou une répartition des dopants choisie pour obtenir un mode transversal de la cavité laser.

L'étape de réalisation peut être une étape d'assemblage réalisée  
30 par collage ou par adhérence moléculaire ou encore par diffusion bonding.

Selon un autre mode de fabrication l'étape de réalisation est une étape de préforme de fibre à saut d'indice ou de préforme de fibre à gradient d'indice des dopants.

Utilisation du laser présentant l'une des caractéristiques mentionnées précédemment pour amplifier un ou plusieurs faisceaux de type laser.

5 Le laser selon l'invention présente notamment les avantages suivants :

- déposer la lumière de pompe dans un volume compatible avec un fonctionnement dans le mode fondamental ( $TEM_{00}$ ) et favoriser ce mode par rapport aux ordres supérieurs,
- 10 • réaliser un système de focalisation simple, indépendant de la structure de la barrette de laser (moyens de pompage) et potentiellement peu onéreux,
- s'affranchir du problème de la divergence de la lumière incidente sur le milieu laser sans avoir à utiliser des matériaux fortement dopés,
- 15 • déposer l'énergie de pompage dans un volume important en comparaison avec les lasers selon l'art antérieur et diminuer ainsi les aberrations optiques d'origine thermique, l'énergie se répartissant dans un volume plus important,
- ne pas dépasser le seuil de dommage (ou endommagement) du matériau laser malgré des puissances de pompe importantes,
- 20

D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront plus clairement dans la description faite à titre d'exemple nullement limitatif à la lecture des figures annexées où :

- la figure 1 représente un exemple de diode laser selon l'art antérieur,
- 25 • la figure 2 est un schéma d'un exemple d'architecture d'un laser selon l'invention,
- les figures 3a et 3b représentent la propagation d'un rayon lumineux dans le milieu actif dopé de manière non homogène,
- la figure 4 montre une variante de diode laser de pompage,
- 30 • la figure 5 illustre deux exemples d'optique de couplage connues de l'Homme du métier, et
- les figures 6 et 7 représentent deux exemples de schéma utilisant le laser selon l'invention comme amplificateur.

De manière à mieux faire comprendre le principe de fonctionnement du laser selon l'invention, la description qui suit à titre d'exemple illustratif et nullement limitatif concerne un laser pompé diode associé à l'aide d'une optique de couplage simple à un milieu laser actif  
5 dopé non-uniformément afin notamment de privilégier le mode transversal  $TEM_{00}$  de la cavité laser.

La figure 2 représente un exemple d'architecture d'un module laser selon l'invention. Ce module est composé d'un milieu laser actif 3 dopé  
10 de manière non homogène et favorisant un mode laser particulier tel que le mode transversal  $TEM_{00}$ , d'une diode laser de pompe 4, de moyens 5 de couplage du faisceau de pompe issu de la diode laser de pompe 4 au milieu laser actif 3. La cavité du laser est fermée par un miroir 6.

Le miroir 6 est par exemple disposé dans l'axe optique du laser,  
15 perpendiculairement au faisceau laser. Il présente des caractéristiques de transmission adaptées pour optimiser le fonctionnement du laser.

#### Diode laser de pompage

La diode laser de pompage 4 peut être une diode laser unitaire, ou un assemblage de diodes laser (barrettes, empilement de barrettes,  
20 plaques à émission par la surface,...) tel que décrit par exemple à la figure 1, ou encore tout assemblage de diodes ou de diodes unitaires. Le faisceau émis par une telle structure est par exemple remis en forme avant d'être transmis au milieu actif laser.

La diode laser peut aussi se présenter sous une forme de  
25 plusieurs barrettes disposées de façon telle que l'émission ait lieu dans les trois dimensions. Un exemple d'une telle structure est donné à la figure 4, une telle structure pouvant être utilisée avec ou sans optique de couplage.

#### Moyens de couplage

Les moyens de couplage 5 sont adaptés au type de la diode laser  
30 de pompage utilisée. Pour un pompage de type longitudinal, il est par exemple possible d'utiliser un concentrateur de lumière tel que décrit dans une des références suivantes :

[1] le document ayant pour titre " High efficiency  $TEM_{00}$  Nd:YVO<sub>4</sub> laser longitudinally pumped by a high power laser diode array ", SPIE Proceeding,



[2] le document ayant pour titre " Nonimaging optics III : Maximum Efficiency Light Transfer ", 1995 ayant pour auteurs G.Feugnet, C.Bussac, M.Schwartz, C.Larat et J.P Pocholle ou publié dans la revue Opt.Lett.20, pp 157-159 en 1995.

5 La dimension du concentrateur 5 correspondant à la largeur du barreau laser dans le plan parallèle  $D_{//}$  est par exemple égale à 1,5 mm. L'épaisseur  $e_c$  du concentrateur de lumière est sensiblement constante et égale à 1,5 mm. La face de sortie du concentrateur a une section carrée  $s_c$  sensiblement égale à  $1,5 \cdot 1,5 \text{ mm}^2$ .

10 Milieu actif laser

Le milieu laser actif 3 est formé par exemple d'un barreau composite comportant une zone centrale 8 dopée ayant une forme parallépipédique de section  $s_d$  carrée, par exemple, entourée d'une zone périphérique 9 non dopée c'est-à-dire ne comportant pratiquement pas de  
15 dopant voir aucun dopant.

Le dopant utilisé pour le milieu actif est choisi par exemple parmi un ou plusieurs des ions de la liste suivante : ( $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Th}^{3+}$ ,....).

Le milieu laser actif est par exemple un milieu solide présentant  
20 une ou plusieurs transitions laser (YAG :Nd,  $\text{YVO}_4$  :Nd, saphir :Ti, etc) et connu de l'Homme du métier.

La zone dopée 8 possède une longueur  $L_d$  sensiblement égale à la longueur  $L_l$  du milieu laser actif, une section  $s_d$ , et un volume  $V_d$  correspondant à  $s_d \cdot L_d$ . La lumière de pompe est déposée ou absorbée  
25 dans ce volume  $V_d$  selon par exemple le schéma décrit aux figures 3a et 3b.

La zone dopée 8 a des dimensions adaptées au mode fondamental de la cavité laser par exemple. Elles peuvent aussi être fixées pour favoriser l'apparition d'autres modes transverses. Sa longueur est par exemple choisie en fonction de la quantité de lumière à déposer et de  
30 l'absorption.

Détermination des dimensions de la zone dopée

Une manière pour déterminer la géométrie et les dimensions de la zone dopée non uniformément et/ou la distribution des dopants comporte  
35 par exemple les étapes suivantes :

- 5
- A partir des caractéristiques de la source émissive (diode laser) telles que ses dimensions, ses divergences....concevoir une optique de focalisation. L'optique de focalisation est déterminée par exemple pour avoir une transmission aussi bonne que possible, selon des critères connus de l'Homme du métier. Typiquement, la lumière est focalisée sur une tache dont la section  $s_1$  est de quelques millimètres carrés,
- 10
- Adapter la section du barreau non uniformément dopé aux dimensions de la tache de la lumière.
- 15
- Par exemple, la section du barreau peut être sensiblement carrée, égale ou légèrement plus grande que celle de la face de sortie du concentrateur,
- Pour un barreau cylindrique, le diamètre est sensiblement égal ou légèrement supérieur à la diagonale de la face de sortie du concentrateur,
- 20
- Les dimensions peuvent aussi être choisies pour tenir compte des tolérances de positionnement du barreau devant le concentrateur et la qualité des arêtes du barreau.
- Dans le cas d'une focalisation utilisant une lentille, la section du barreau est adaptée pour que la transmission  $T$  à travers une ouverture fictive de dimensions identiques soit de l'ordre de 100%
- avec  $T = \frac{\iint_{\text{section de l'ouverture}} I(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy}$
- 25
- où  $I(x, y)$  est la répartition de l'intensité au point de focalisation de la lumière,
- 30
- Le rapport  $r$  entre les dimensions de la zone dopée et celles de la zone non dopée est défini en tenant compte des caractéristiques du rayonnement de pompe prises après l'optique de couplage 5, des caractéristiques spectroscopiques du matériau laser et des contraintes technologiques liées à la réalisation du barreau non uniformément dopé. Les caractéristiques spectroscopiques du matériau laser peuvent être enregistrées au cours d'essais préalables par des méthodes connues de l'Homme du métier.

➤ Le processus de détermination du rapport  $r$  se déroule par exemple de manière itérative, et comporte par exemple les étapes suivantes :

5

➤ au cours d'une première étape a), fixer la valeur du rapport  $r$  à une valeur  $r_0$ ,

➤ calculer (deuxième étape b)) la répartition d'énergie de pompe dans le barreau et les effets thermiques associés à partir de cette valeur, en mettant en œuvre un programme de tracé de rayon et un programme de calculs thermiques,

10

➤ au cours d'une troisième étape c), concevoir une cavité laser dont le mode  $TEM_{00}$  est proche des dimensions de la zone dopée par exemple à l'aide d'un programme de calcul de cavité laser prenant en compte les effets thermiques,

15

➤ si le mode  $TEM_{00}$  déterminé est différent ou trop éloigné, changer la valeur du ratio choisie initialement et recommencer les étapes a) à c). La valeur de la longueur de la cavité laser peut en effet être limitée pour des raisons d'encombrement.

Les différentes méthodes de calcul mises en œuvre dans les étapes précédemment énoncées sont connues de l'Homme du métier.

20

Lors de la détermination de la valeur du rapport  $r$ , il est nécessaire de tenir compte des contraintes suivantes :

25

- l'influence de sa valeur sur la longueur du barreau nécessaire pour absorber l'énergie sachant que cette longueur peut être limitée pour des raisons de technologie,
- l'influence de sa valeur sur l'énergie absorbée par unité de longueur qui doit demeurer largement inférieur au seuil de dommage optique.

Pour obtenir une bonne discrimination entre le mode fondamental de la cavité et les modes d'ordre supérieurs, favorisant ainsi le fonctionnement  $TEM_{00}$ , les dimensions de la zone dopée sont choisies en fonction des dimensions du mode fondamental de la cavité laser.

30

Ainsi, la section  $s_d$  de la zone dopée est de préférence inférieure ou égale à la section  $s_m$  du mode fondamental de la cavité. Elle peut aussi

être légèrement supérieure ou supérieure à la section du mode fondamental et associée à un autre dispositif de sélection.

La section  $s_m$  du mode fondamental correspond par exemple à la section du faisceau laser prise à environ 13,6 % du maximum.

5 Les étapes décrites en relation avec une géométrie carrée peuvent aussi être appliquée dans le cas d'une géométrie cylindrique, en considérant dans ce cas la section cylindre de la zone dopée.

L'interface entre la zone dopée 8 et la zone périphérique 9 sera réalisée de manière à minimiser les pertes susceptibles de gêner ou de  
10 détériorer le fonctionnement du laser, selon des techniques connues de l'Homme du métier.

Les dimensions de la zone périphérique 9 sont choisies par exemple en fonction des performances de l'optique de focalisation, par exemple la tache de focalisation, la divergence du rayonnement après le  
15 point de focalisation. La section  $S_{nd}$  et  $S_d$  est sensiblement égale à la section  $S_c$  de la face du concentrateur disposée en regard. La longueur  $L_{nd}$  de la zone non dopée correspond par exemple à la longueur du matériau ou milieu actif formant le laser. Elle peut correspondre à la longueur  $L_d$  de la zone dopée.

20 Sans sortir du cadre de l'invention, le dopage peut aussi être obtenu sous la forme d'un gradient de dopants répartis de manière non homogène dans le matériau formant le milieu actif. Le gradient, la répartition des dopants ainsi que leur nature seront déterminés en fonction du mode de fonctionnement retenu pour le laser.

25 Selon une autre variante de réalisation, le barreau comprend au moins à une de ses extrémités une section totalement non dopée. Cette technique permet de diminuer les déformations aux extrémités d'un barreau. Le contact entre les sections non dopées et les sections dopées de manière non homogène peut être réalisé par une technique de diffusion bonding  
30 connue de l'Homme du métier.

Les deux faces externes 10, 11 du barreau composite sont polies pour guider la lumière de pompe par réflexion totale ou pratiquement totale.

La face 10 du barreau composite qui se trouve en regard du  
35 concentrateur 5 est traitée au moyen d'un traitement anti-reflet à la longueur

d'onde de pompage et pour être totalement réfléchissante à la longueur d'onde laser.

La face opposée 11 du barreau est traitée à l'aide d'un traitement anti-reflet à la longueur d'onde laser. Cette face peut être polie inclinée afin  
5 que le faisceau ait une valeur d'angle d'incidence proche de la valeur de Brewster. Lors du montage du barreau laser les précautions nécessaires habituelles seront prises pour éviter qu'une partie du faisceau ne se propage dans un autre milieu accolé.

10 Les figures 3a et 3b schématisent un exemple d'un trajet de la lumière pompe dans le milieu laser actif comportant une zone dopée centrale de forme parallélipédique telle que représentée sur la figure 2. Lors de sa propagation dans le barreau laser, le faisceau laser ne traverse pas nécessairement la zone non dopée à chaque réflexion. La puissance de la  
15 pompe est déposée uniquement dans la zone centrale dopée ce qui favorise le fonctionnement TEM<sub>00</sub>. De plus, une telle structure permet de s'affranchir de la divergence de la lumière de pompe incidente sur le milieu composite.

Ainsi, sur les trajets 12 en pointillés il n'y pas d'absorption de lumière alors que sur les trajets 13 des rayons lumineux représentés en traits  
20 pleins le rayon lumineux est absorbé. La lumière de pompe est guidée par réflexion sur les faces latérales du milieu laser, réflexion totale interne ou sur un traitement diélectrique et effectue aussi un trajet en zigzag dans le barreau composite en déposant de l'énergie uniquement dans la zone dopée  
25 sera absorbée.

La géométrie (forme et dimensions) de la zone non dopée est adaptée pour optimiser le nombre de faisceaux la traversant tout en assurant un guidage en réflexion totale.

En comparaison avec les structures à dopage élevé précitées, la  
30 puissance de pompe se trouve répartie dans un volume plus grand que le volume habituellement offert par les lasers de l'art antérieur, ce qui permet notamment de réduire les aberrations, les contraintes, les biréfringences d'origine thermique.

Selon une autre variante de réalisation, le milieu actif comporte une zone centrale non dopée et une zone périphérique dopée. Dans ce cas, le trajet lumineux va déposer de l'énergie non plus de façon centrale mais à la périphérie du barreau de composite, favorisant ainsi les modes d'ordre supérieurs. Cet agencement favorise le mode habituellement appelé en couronne.

Selon une autre variante, connue par exemple dans le domaine des fibres dites "double clad", technique décrite par exemple dans le brevet US 4,815,079 la zone dopée est décentrée par rapport à la zone qui guide la pompe ou encore, la zone guidante possède une forme particulière, par exemple en forme de D.

Ces modes de réalisation qui consistent à casser la symétrie du milieu optimisé permettent de diminuer le nombre de rayons lumineux (ou de modes de propagation pour les fibres) qui ne pénètrent jamais dans la zone dopée et ne sont pas absorbés. L'absorption est ainsi augmentée.

#### Méthode de fabrication d'un barreau composite formant le milieu émissif.

Plusieurs procédés de fabrication peuvent être mis en œuvre pour réaliser le milieu laser actif.

Une façon de fabriquer un barreau composite dopé de manière non homogène comporte par exemple des étapes d'assemblage de morceaux discrets dopés ou non dopés d'une matrice qui auront été polis avant assemblage.

La matrice est par exemple choisie parmi la liste suivante : YAG, YLF, YVO<sub>4</sub>, GdCOB, verre.

Les différents morceaux sont assemblés selon la géométrie de dopage souhaitée, par exemple :

- par collage avec une colle d'indice adapté, telle qu'une colle optique connue de l'Homme du métier,
- par adhérence moléculaire,
- par diffusion bonding ou soudure par interdiffusion aux interfaces entre les morceaux. Cette technique offre notamment une résistance importante aux chocs et de faibles pertes aux interfaces.

Une autre manière de procéder repose sur l'utilisation de techniques utilisées dans les fibres optiques et connues de l'Homme du

métier. Ces dernières présentent comme avantage de réaliser une préforme avec une partie dopée et une partie non dopée préforme de fibre à saut d'indice ou encore une préforme avec une transition progressive entre la zone dopée et la zone non dopée telle que la préforme de fibre à gradient d'indice. Les dopants sont distribués sous la forme d'un gradient à l'intérieur de la zone dopée.

Cette préforme peut être tirée pour rendre son diamètre compatible avec les dimensions nécessaires pour cette application. La matrice est par exemple du verre de différentes compositions tel que silicate, phosphate, fluoré ou tout autre matériau pour lequel la technique de tirage est adaptée.

Une telle technique permet notamment de réaliser des zones dopées de section circulaire particulièrement bien adaptée à la section des modes fondamentaux de la cavité.

15

Dans les différentes applications de l'ensemble laser comportant un laser pompé diode avec un milieu laser selon l'invention, différents moyens de focalisation peuvent être utilisés

Pour réaliser la fonction de focalisation deux approches peuvent être distinguées :

- Une première approche consiste à prendre en compte la nature discontinue de la source lumineuse et à imager chacune des diodes de la barrette. Des systèmes à base de faisceaux de fibres optiques, par injection optique dans une ou plusieurs fibres optiques, d'optiques réfractives telles que des lentilles, des lentilles cylindriques, d'optiques diffractives par exemple des lentilles holographiques, des micro-lentilles, de système par réflexion par exemple des micro-miroirs ou encore toute combinaison de ces systèmes peut être utilisée. Ils permettent d'obtenir une focalisation de la lumière performante car les zones non émissives ne sont pas prises en compte. Ils sont utilisés plus particulièrement pour des barrettes comportant un faible nombre d'émetteurs.
- Une deuxième approche consiste par exemple à considérer la barrette dans sa globalité sans tenir compte de la nature discontinue de la source. Des systèmes à base de lentilles macroscopiques, de concentrateurs

correspondent par exemple à cette approche. Ces systèmes présentent l'avantage d'être relativement simples à réaliser. Ils sont aussi utilisables quel que soit le nombre d'émetteurs et la source lumineuse est interchangeable.

5 Il est aussi possible d'utiliser des systèmes de redistribution d'étendue ou de remise en forme de l'étendue géométrique du faisceau, par exemple tel que représentés à la figure 5.

Sans sortir du cadre de l'invention, le laser selon l'invention peut aussi être utilisé comme amplificateur d'un faisceau laser.

10 La figure 6 schématise un exemple de réalisation d'utilisation de structure comportant un barreau dopé non uniformément telle que décrite à la figure 2 pour amplifier un faisceau laser provenant d'une source laser.

Le faisceau laser incident 20 pénètre avec un angle différent de zéro dans la structure amplificatrice 21 et en ressort par exemple avec une direction sensiblement parallèle à la direction incidente sous la forme d'un  
15 faisceau laser amplifié 22.

L'angle d'incidence doit être faible pour que le faisceau traverse la totalité ou au moins la majorité de la zone dopée. La section du faisceau peut être légèrement inférieure à la section de la zone dopée.

20 Les dimensions des zones dopées et non dopées sont choisies pour augmenter l'énergie du faisceau incident tout en conservant le mode laser, par exemple le mode  $TEM_{00}$ .

Une telle utilisation permet avantageusement d'augmenter l'énergie du faisceau tout en conservant le mode de fonctionnement  $TEM_{00}$ .

25 Le faisceau laser amplifié peut être un faisceau laser issu d'un laser femtosecondes.

La structure de laser selon l'invention peut aussi être utilisée  
30 comme un amplificateur régénératif dont un exemple de réalisation est donné à la figure 7.

Sur cet exemple de réalisation, un faisceau laser  $F_0$  à amplifier arrive sur un polariseur 30 adapté pour le transmettre en totalité (100%) ou au moins en majorité à un dispositif tel qu'une cellule de Pockels 31 agissant  
35 notamment comme une lame à retard de phase et connue de l'Homme du



métier. En entrée de cellule de Pockels le faisceau  $F_e$  possède par exemple une polarisation linéaire. Il ressort de cette cellule avec une polarisation circulaire avant d'être transmis au bloc 32 comportant les éléments décrits à la figure 2, notamment le milieu laser dopé de manière non homogène, le miroir 6 étant remplacé par un miroir 33 de fond de cavité disposé après le polariseur.  $F_1$  se réfléchit sur la face 10 du barreau dopé de manière non uniforme et ressort par la face 11. Il passe ensuite à travers la cellule de Pockels 32 d'où il ressort avec une polarisation sensiblement perpendiculaire à sa polarisation initiale (celle du faisceau  $F_e$ ). Il est ainsi transmis au miroir 33 de fond de cavité sur lequel il va se réfléchir. Le faisceau  $F_1$  est ainsi emprisonné dans la structure comportant le bloc 32 et le miroir 33 la cellule de Pockels permettant de le faire entrer et sortir. Il effectue ainsi plusieurs aller-retours au cours desquels il acquiert de l'énergie, et est donc amplifié. La valeur du gain  $G$  obtenu dépend notamment du nombre d'aller-retours effectués et de la structure du barreau dopé de manière non homogène.

Lorsque le faisceau  $F_1$  a acquis le gain souhaité, la cellule de Pockels permet de l'extraire, le faisceau de sortie  $F_s$  étant égal à  $G \cdot F_e$ .

Le fonctionnement d'une cellule de Pockels étant connu de l'Homme du métier, il n'a pas été détaillé.

De manière générale, le dispositif lorsqu'il est utilisé comme amplificateur d'un faisceau laser comporte au moins les éléments suivants : une source lumineuse ayant pour fonction notamment d'exciter un milieu laser, un dispositif de couplage du faisceau de lumière issu de la source vers le milieu laser. Le milieu laser utilisé comporte une zone dopée et une zone non dopée au moins, présentant l'une des caractéristiques énoncées en relation avec la figure 2 de façon à augmenter l'énergie de puissance d'un faisceau laser à amplifier.

## REVENDICATIONS

1 – Laser pompé longitudinalement comprenant un ou plusieurs milieux actifs lasers disposés dans une cavité optique et au moins un moyen de  
5 pompage (4) émettant au moins un faisceau de pompe vers le ou les milieux actifs lasers (3), des moyens de couplage (5) du ou des faisceaux de pompe avec le milieu actif caractérisé en ce qu'au moins un des milieux actifs lasers comporte une ou plusieurs zones (8) dopées de façon non homogène et en  
ce que la dimension desdites zones (8) dopées et/ou la répartition des  
10 dopants est choisie en fonction du mode transversal de la cavité laser souhaité.

2 – Laser selon la revendication 1 caractérisé en ce que la zone dopée (8) est disposée de manière sensiblement centrale dans le milieu actif (3), ses  
15 dimensions sont adaptées au mode fondamental de la cavité laser ou au mode transversal et en ce que la zone périphérique non dopée a des dimensions adaptées au moyen de couplage (5).

3 – Laser selon l'une des revendications 1 ou 2 caractérisé en ce que la  
20 section  $s_d$  de la face d'entrée de la zone dopée qui reçoit le faisceau de pompe est inférieure ou égale à la section  $s_m$  du mode fondamental de la cavité.

4 – Laser selon l'une des revendications 1 ou 2 caractérisé en ce que la  
25 section  $s_d$  de la face d'entrée de la zone dopée qui reçoit le faisceau de pompe est au moins supérieure à la section  $s_m$  du mode fondamental de la cavité.

5 – Laser selon la revendication 1 caractérisé en ce que le milieu actif (3)  
30 comporte une zone centrale non dopée entourée d'une zone périphérique dopée.

6 – Laser selon l'une des revendications précédentes caractérisé en ce que la zone dopée a une forme parallépipédique ou circulaire ou elliptique.

7 – Laser selon l'une des revendications 1 à 6 caractérisé en ce le ou lesdits moyens de pompage (4) comportent une ou plusieurs barrettes de diode et en ce que lesdits moyens de couplage (5) sont constitués d'un concentrateur de lumière adapté à recevoir l'ensemble de la lumière émise desdites barrettes de diodes.

8 – Laser selon l'une des revendications 1 à 6 caractérisé en ce que lesdits moyens de couplage comportent au moins un des dispositifs choisis dans la liste suivante : un système de focalisation par réfraction ou un système par diffraction ou un système par réflexion ou un système de remise en forme de l'étendue d'un faisceau.

9 – Laser selon la revendication 1 caractérisé en ce que la distribution des dopants dans le milieu actif est réalisée selon un gradient.

10 – Laser selon l'une des revendications précédentes caractérisé en ce que les dopants sont choisis parmi un ou plusieurs des ions de la liste suivante : ( $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Th}^{3+}$ , ....).

11 – Laser selon l'une des revendications précédentes caractérisé en ce que la face du milieu actif en regard du moyen de couplage est traitée anti-reflet à la longueur d'onde de pompage et réfléchissante à la longueur d'onde laser et en ce que la face du milieu actif à l'opposé est traitée antireflet à la longueur d'onde laser.

12 - Procédé de fabrication d'un milieu actif utilisé dans les lasers caractérisé en ce qu'il comporte au moins une étape de réalisation d'un ou de plusieurs morceaux d'une matrice dopée de façon non homogène et d'une matrice non dopée de façon à obtenir un milieu actif comportant une ou plusieurs zones ou volume ayant une dimension et/ou une répartition non homogène des dopants choisie pour obtenir un mode transversal de la cavité laser.

13 - Procédé de fabrication selon la revendication 12 caractérisé en ce que l'étape de réalisation est une étape d'assemblage réalisée par collage ou par adhérence moléculaire ou par diffusion bonding.

- 5 14 – Procédé de fabrication selon la revendication 12 caractérisé en ce que l'étape de réalisation est une étape de préforme de fibre à saut d'indice ou de préforme de fibre à gradient d'indice des dopants.

- 10 15 - Utilisation du laser selon l'une des revendications 1 à 11 comme amplificateur d'un ou de plusieurs faisceaux laser.

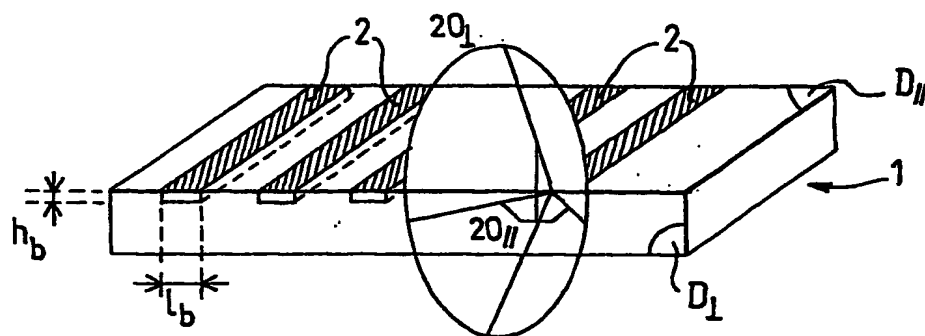


FIG. 1

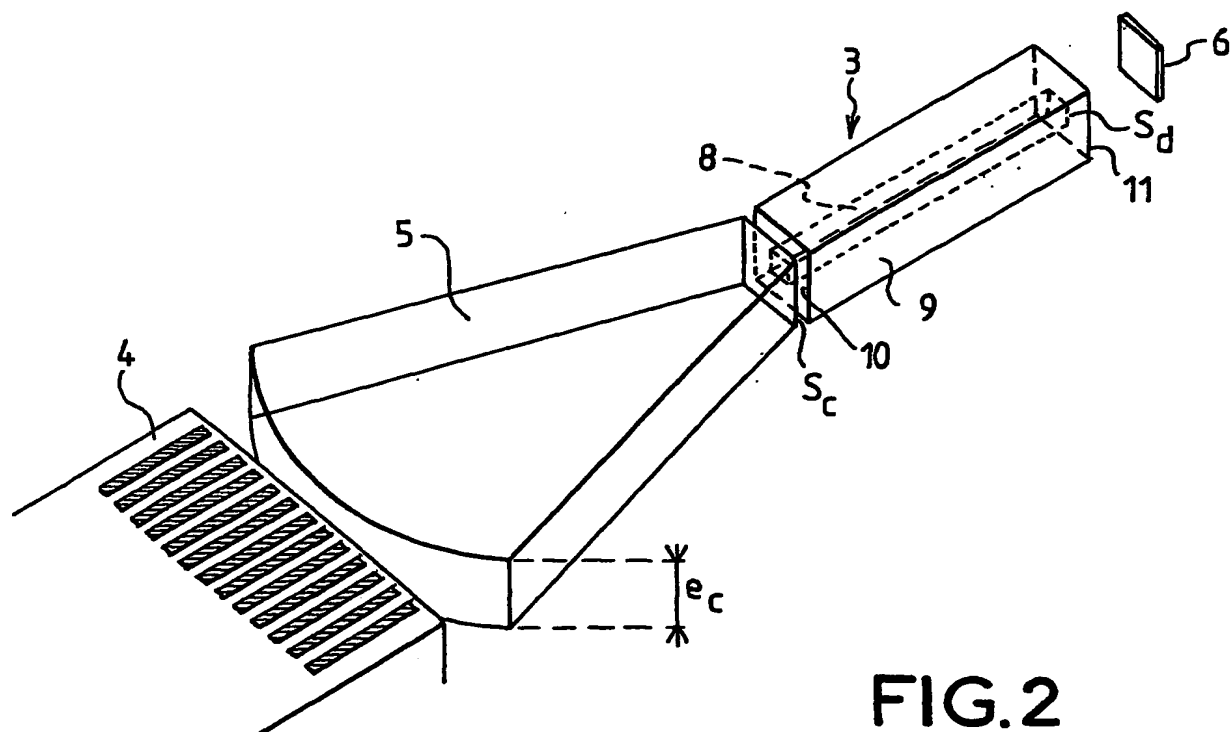


FIG. 2



1

2

3

4

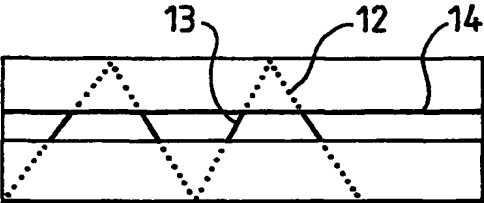


FIG. 3a

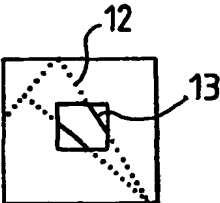


FIG. 3b

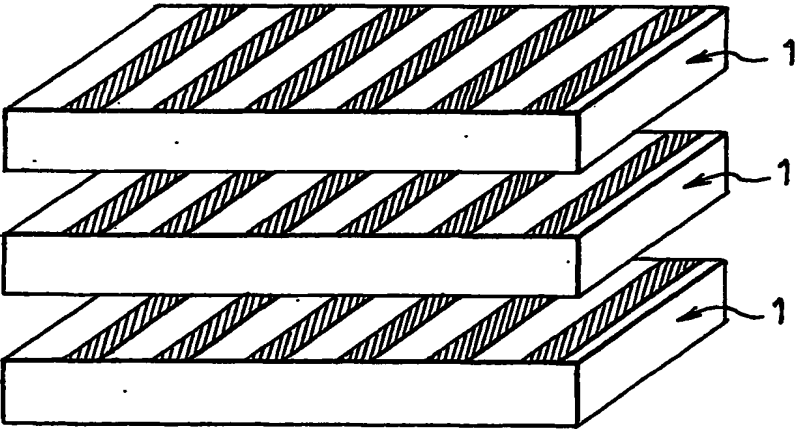


FIG. 4



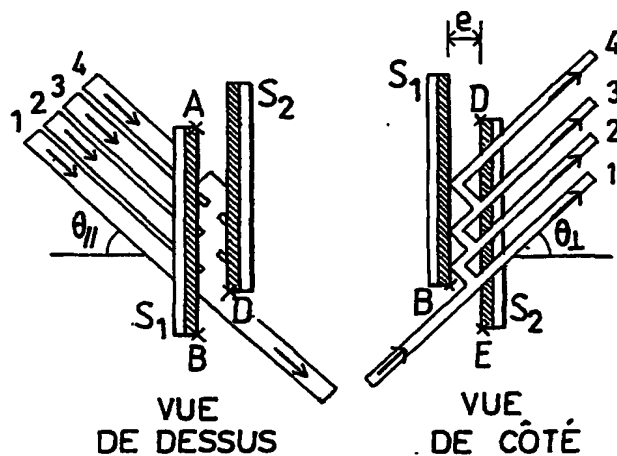
3

0

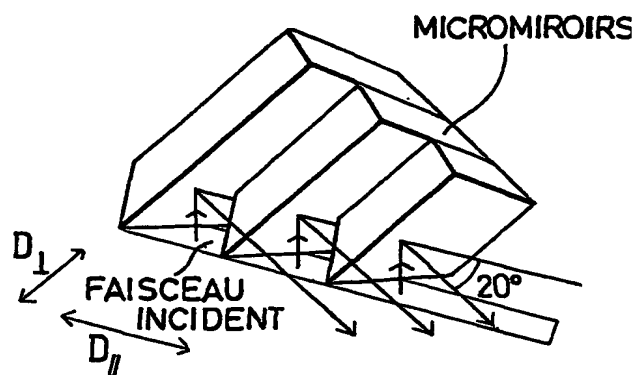
.

.





W.A. CLARKSON AND D.C.  
HANNA, OPT. LETT, OSA 1996



R.P. EDWIN, OPT. LETT, OSA 1995

FIG. 5

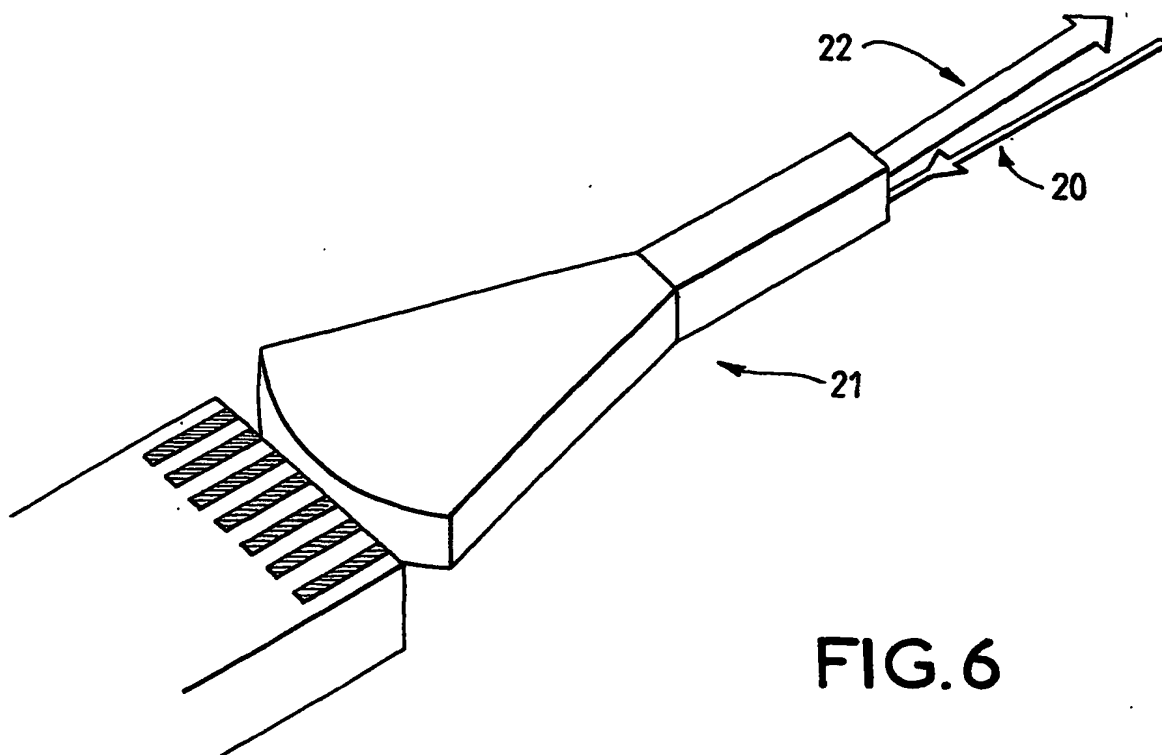


FIG. 6



1

2

3

4

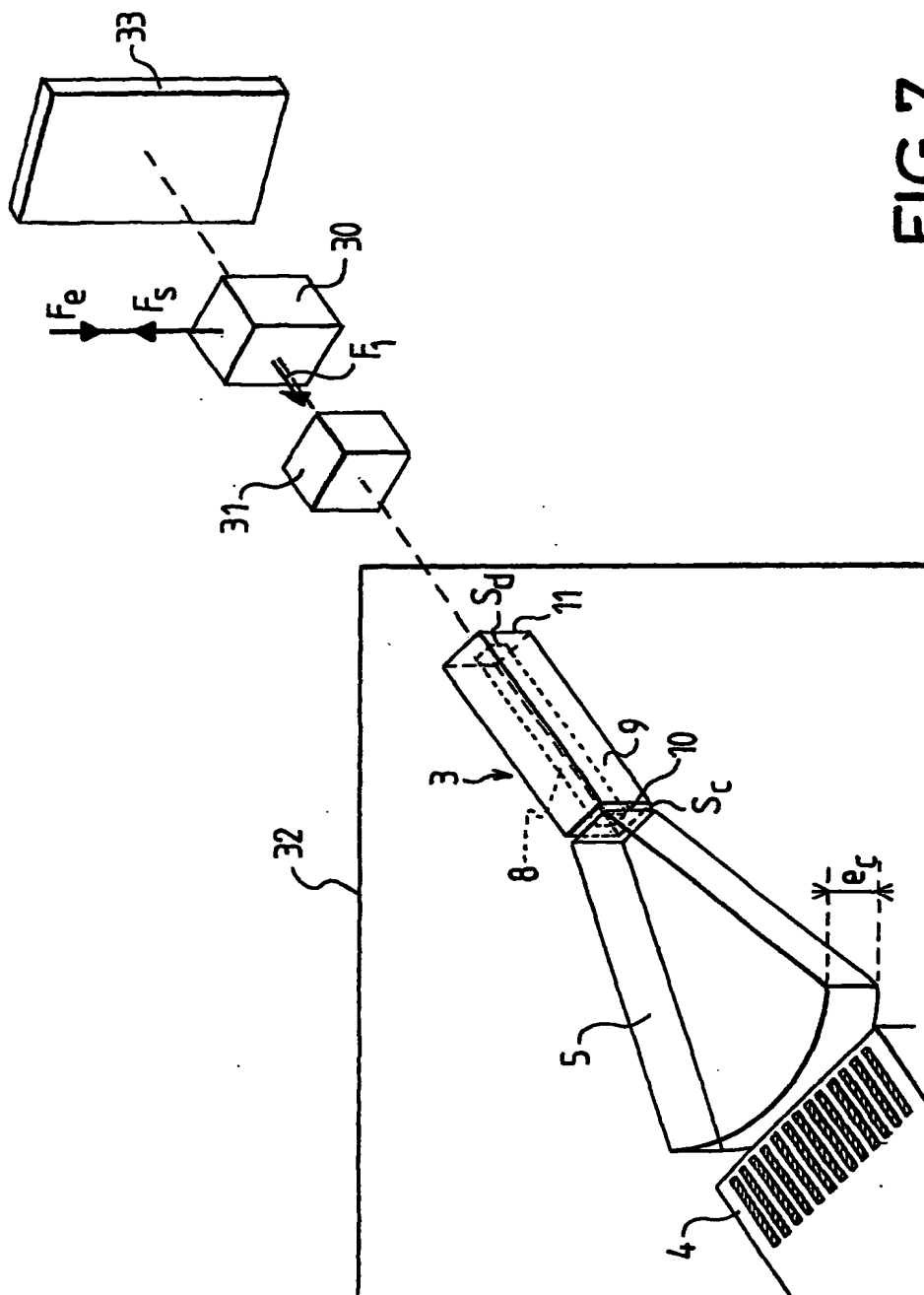


FIG. 7



4

5

6

7

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/FR 01/01813

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**  
IPC 7 H01S3/0941

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 H01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC, COMPENDEX

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	US 5 877 890 A (SNITZER ELIAS) 2 March 1999 (1999-03-02) column 1 -column 2	1,2,5,6, 9,10 12,14
X A	EP 0 570 743 A (MATSUSHITA ELECTRIC IND CO LTD) 24 November 1993 (1993-11-24) column 3, line 35 - line 55	1,10 12,14
A	FEUGNET G ET AL: "HIGH-EFFICIENCY TEMOO ND:YVO4 LASER LONGITUDINALLY PUMPED BY A HIGH-POWER ARRAY" OPTICS LETTERS,US,OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, vol. 20, no. 2, 15 January 1995 (1995-01-15), pages 157-159, XP000486637 ISSN: 0146-9592 the whole document	1,7,8,10

☐ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

\* Special categories of cited documents :

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- \*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- \*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- \*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- \*&\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

27 September 2001

Date of mailing of the international search report

05/10/2001

Name and mailing address of the ISA  
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Hervé, D

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/FR 01/01813

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5877890	A	02-03-1999	NONE	
EP 0570743	A	24-11-1993	JP 5310440 A	22-11-1993
			EP 0570743 A1	24-11-1993
			US 5321708 A	14-06-1994

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale No

PCT/FR 01/01813

**A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE**  
CIB 7 H01S3/0941

*Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB*

**B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE**

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

CIB 7 H01S

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC, COMPENDEX

**C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS**

Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X A	US 5 877 890 A (SNITZER ELIAS) 2 mars 1999 (1999-03-02) colonne 1 -colonne 2	1,2,5,6, 9,10 12,14
X A	EP 0 570 743 A (MATSUSHITA ELECTRIC IND CO LTD) 24 novembre 1993 (1993-11-24) colonne 3, ligne 35 - ligne 55	1,10 12,14
A	FEUGNET G ET AL: "HIGH-EFFICIENCY TEMOO ND:YVO4 LASER LONGITUDINALLY PUMPED BY A HIGH-POWER ARRAY" OPTICS LETTERS,US,OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, vol. 20, no. 2, 15 janvier 1995 (1995-01-15), pages 157-159, XP000486637 ISSN: 0146-9592 le document en entier	1,7,8,10

☐ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

\* Catégories spéciales de documents cités:

"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent

"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date

"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)

"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens

"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

"8" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

27 septembre 2001

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

05/10/2001

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tél. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Hervé, D

**RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE**

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale No

PCT/FR 01/01813

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 5877890	A	02-03-1999	AUCUN	
EP 0570743	A	24-11-1993	JP 5310440 A	22-11-1993
			EP 0570743 A1	24-11-1993
			US 5321708 A	14-06-1994